

DOI: 10.20103/j.stxb.202311252577

赵堃, 龚政, 文天翼, 康彦彦, 韩广轩. 潮沟曲流摆动对潮滩沉积物碳输出的影响——以江苏中部潮滩为例. 生态学报, 2024, 44(14): 6154-6164.

Zhao K, Gong Z, Wen T Y, Kang Y Y, Han G X. Role of tidal meander migration on carbon release of tidal flat sediments: a case study of the central Jiangsu tidal flats. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 6154-6164.

潮沟曲流摆动对潮滩沉积物碳输出的影响 ——以江苏中部潮滩为例

赵 堃^{1,2}, 龚 政^{1,2,*}, 文天翼³, 康彦彦⁴, 韩广轩⁵

1 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098

2 河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 南京 210098

3 中铁水利水电规划设计集团有限公司, 南昌 330029

4 河海大学海洋学院, 南京 210098

5 中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 烟台 264003

摘要: 潮滩是全球固碳能力最高的生态系统之一, 是缓解全球变暖的有效蓝色碳汇。针对潮滩碳汇功能, 现有研究多关注生物作用下的碳输入过程, 关于地貌演变, 特别是潮沟曲流摆动引起的沉积物碳输出过程研究较少, 因此无法准确评估潮滩碳汇功能的动态变化。研究结合野外观测、遥感反演与室内实验, 探究了潮沟曲流摆动对潮滩沉积物碳输出过程的影响, 从曲流摆动速率与有机碳空间分布特征两方面开展分析。研究表明: 潮沟曲流摆动速率的空间差异可达数个量级, 由粉砂滩的 10^{-3} m/s 锐减至互花米草盐沼滩的 10^{-6} m/s; 粉砂淤泥滩潮沟摆动速率存在显著的季节性差异, 冬季摆动速率约为夏季的两倍; 潮滩土壤有机碳含量呈海向递减趋势: 互花米草盐沼滩 (4.62 g/kg) > 粉砂淤泥滩 (2.61 g/kg) > 粉砂滩 (1.51 g/kg); 综合考虑曲流摆动速率与土壤有机碳含量, 发现粉砂滩沉积物碳输出速率显著高于互花米草盐沼滩, 可达 $49.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 与该区域的碳埋藏速率相当。研究证实了潮沟曲流摆动对潮滩沉积物碳输出过程的重要性, 为提升潮滩碳汇功能预测水平提供了重要的理论依据与数据支撑。

关键词: 曲流摆动; 碳输出; 碳汇功能; 潮沟; 潮滩; 崩岸

Role of tidal meander migration on carbon release of tidal flat sediments: a case study of the central Jiangsu tidal flats

ZHAO Kun^{1,2}, GONG Zheng^{1,2,*}, WEN Tianyi³, KANG Yanyan⁴, HAN Guangxuan⁵

1 The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China

2 Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China

3 China Railway Water Conservancy and Hydropower Planning and Design Group, Nanchang 330029, China

4 College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China

5 Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

Abstract: Tidal flats are among the ecosystems with the highest carbon sequestration capacity globally, serving as effective blue carbon sinks to mitigate global warming. Current research on this issue primarily focuses on carbon input processes driven by biological activities, while carbon output processes under geomorphic evolution, especially tidal meander migration, are limited. This knowledge gap makes it challenging to accurately predict and assess the carbon sequestration

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (52201318); 国家杰出青年科学基金 (51925905); 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3106204)

收稿日期: 2023-11-25; **网络出版日期:** 2024-05-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gongzheng@hhu.edu.cn

capability of tidal flats. Here we integrate field observations, remote sensing with laboratory experiments to investigate the impact of tidal meander migration on carbon release of tidal flat sediment. Results show that the range of variation characterizing the migration rates of tidal meanders can actually span many orders of magnitude, which sharply decreases from 10^{-3} m/s on silty flats to 10^{-6} m/s in salt marshes. The migration rates of tidal meanders in the muddy silt flats exhibit significantly seasonal variability, with the rates in winter being approximately twice of those observed in summer. The content of organic carbon in tidal flat soil demonstrates a seaward declining trend: salt marshes (4.62 g/kg) > muddy flats (2.61 g/kg) > silty flats (1.51 g/kg). By integrating the migration rate of tidal meanders and soil organic carbon content, we found that carbon release rate of sediment measured on silt flats ($49.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) was much higher than in salt marshes and muddy flats, which is comparable to the carbon buried rate on unvegetated flats. Overall, our study confirms the importance of tidal meander migration on sediment carbon release, providing crucial theoretical foundations and data support for enhancing the prediction of carbon sink function of tidal flats.

Key Words: tidal meander migration; carbon release; carbon sink function; tidal channels; tidal flats; bank collapse

潮滩是陆地-海洋生态系统的过渡地带,同时具备高生产力与低降解速率两大特点,是全球固碳能力最高的生态系统之一^[1-2]。潮滩生态系统具有很高的碳捕获与碳存储能力,是缓解全球变暖的有效蓝色碳汇^[3-4],在实现国家双碳战略目标中发挥着重要作用。潮滩生态系统通常由潮间带上部的盐沼区域和潮间带中下部的光滩区域构成^[5-6]。作为二者之间的纽带,潮沟控制着潮滩生态系统内部水-沙-营养物质的交换^[7-11]。近年来,有研究表明盐沼区域潮沟有机碳的净输出速率(至光滩)可达 $(52 \pm 14) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,约为潮滩年固碳速率 $(168 \pm 7) \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的三分之一^[1, 12]。因此,潮滩系统的碳汇功能由盐沼区域和光滩区域共同决定^[13-15]。

针对潮滩系统的碳汇功能,学者多关注生物作用下盐沼区域的碳埋藏速率^[16-17],考虑海平面上升^[18]、气候变化^[19]、植被群落分布^[4]、泥沙供给^[20]等因素影响。然而,潮间带中下部具有面积广阔的泥质光滩,其特有的滩槽交错格局导致地形地貌处于动态的交替演变^[21],显著影响潮滩系统的碳汇功能。特别地,在潮流与渗流的交替作用下,潮沟曲流频繁地迁移、摆动^[22-25],释放出深埋已久的底层沉积物。这些沉积物通常富含有机质^[4, 26],接触空气后会迅速氧化,导致潮滩沉积物碳输出^[27-30]。因此,如何量化阐明潮沟曲流摆动对潮滩沉积物碳输出的贡献、分析其可能存在的空间差异,值得进一步探究。

目前潮沟形态观测的主流手段是卫星遥感^[31-33],其优势在于时间和空间上的广度,多用于河口和潮滩系统的长期地貌观测。但该方法易受气象条件影响(如多云天气),且精度达到亚米级的遥感图片不易获取,难以进行潮沟曲流微尺度、短历时的动态监测。然而,光滩区域潮沟曲流的迁移摆动是快速、跳跃、甚至不连续的过程,频繁发生的裁弯取直过程使其形态在单个潮周期内即可发生显著变化^[34-35]。因此,以往采用的大尺度、长周期观测方法会严重低估潮沟曲流的迁移摆动速率,无法准确预测、评估因曲流摆动而引起的潮滩沉积物碳输出速率。

本文以江苏中部沿海潮沟为研究对象,开展潮沟曲流形态变化监测与潮滩有机碳含量测定,阐明曲流摆动速率和有机碳含量的空间差异,量化潮沟摆动导致的潮滩沉积物碳输出速率,为提高潮滩碳汇功能预测水平提供理论依据与数据支撑。

1 研究区域概况

本研究以江苏中部沿海川东港南侧潮沟曲流为研究对象,如图 1 所示。该区域具有坡度缓(0.01%—0.03%)、滩面阔(宽度 7—10 km)、潮沟发育显著等特点^[36]。潮滩沉积物以粉砂为主,且呈现出明显的分带性特征,自陆向海依次为互花米草盐沼滩、粉砂淤泥滩,以及粉砂滩区域^[37]。该区域潮汐类型表现为不规则半日潮,平均潮差为 3.68 m,潮间带最大流速为 0.5—1.0 m/s^[38]。近岸潮流为平行于海岸方向的往复流,涨潮流优势显著,平均涨落潮历时比约为 0.73,且涨潮流速大于落潮流速,两者比值约为 1.4^[38]。研究团队于 2012 年

起在该区域设立了多个滩面高程观测站^[39-40],其中 S5,S6,S7 站点分别位于互花米草盐沼滩、粉砂淤泥滩,以及粉砂滩区域(图 1)。前期研究表明 S6 与 S7 区域潮沟无植被覆盖,岸壁高度在 1—2 m 范围内变化,且观测到频繁的崩岸过程^[25]。

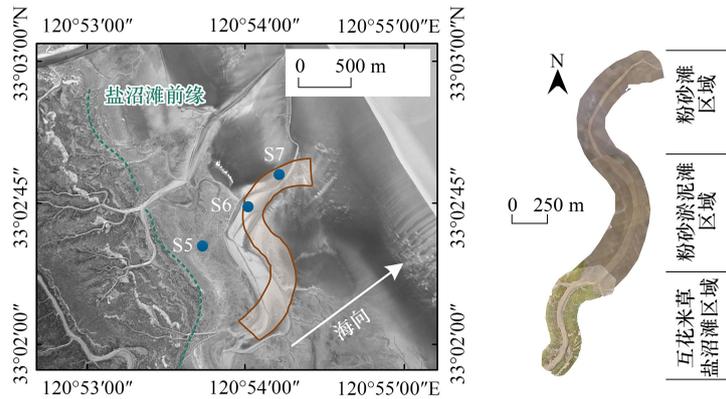


图 1 研究区域位置及潮沟曲流形态

Fig.1 Location of study area and the planform of the investigated tidal meander

2 研究方法

2.1 潮沟曲流形态影像获取

为获取潮沟曲流形态变化,于 2022 年 8 月至 10 月期间共开展 4 次无人机观测。观测时间分别为:8 月 22 日、9 月 9 日、9 月 26 日和 10 月 26 日。由于目标潮沟较长(3 km),且粉砂滩区域远离海岸,无人机起飞点设置在 S6 站点附近,需乘船前往。选用大疆精灵 4 无人机进行潮沟曲流的图像采集,无人机的续航时间为 30 min。考虑到起飞点距离潮沟较远,单次飞行任务的有效时长约为 20 min。因此,潮沟曲流形态由多次任务采集的图像拼接而成,如图 1 所示。无人机搭载有效像素为 2000 万的相机,与之对应的地面采样距离(GSD)为:

$$GSD = H/36.5 \quad (1)$$

式中, H 为无人机相对于拍摄场景的飞行高度(m),飞行高度为 80 m 时,相机图片的分辨率为 2.2 cm。

大疆精灵 4 无人机自带 RTK 定位功能,图像后期处理无需控制点来提供位置信息^[41]。启用 RTK 后,无人机的水平与垂直定位精度均为(± 0.1)m。将无人机航拍照片导入大疆智图软件进行正射影像建模,即可得到单次飞行任务所观测的潮沟曲流形态,如图 2 所示。

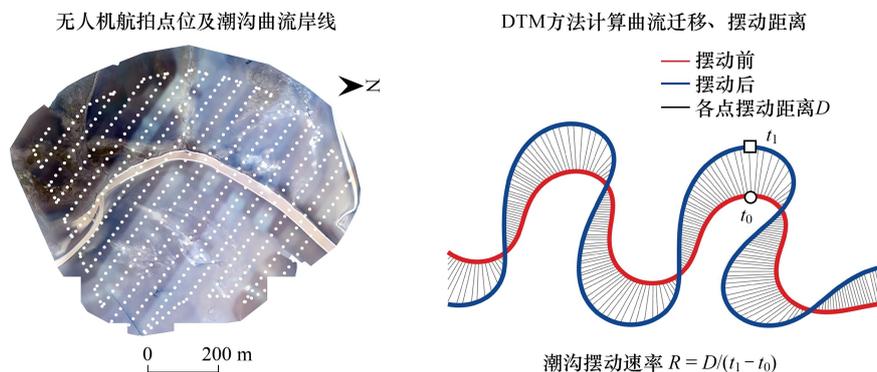


图 2 无人机航拍点位与潮沟曲流摆动速率计算

Fig.2 The UAV photography points and the calculation of tidal meander migration rate

UAV: 无人机 Unmanned aerial vehicle;DTM:动态时间规整法 Dynamic time warping

为获取潮间带中下部粉砂滩区域潮沟形态,选择在大潮期间进行观测(即每月的初一与十五)。由于露滩时长较短(3—4 h),无人机拍摄区域不宜过大,每次观测前都会进行预飞行。基于现场生成的大范围正射影像(飞行高度为 150—180 m),勾勒出潮沟的大致轮廓和走向,进行无人机航拍作业。表 1 给出了 10 月 26 日观测任务的具体流程。为了验证无人机观测结果的代表性与可靠性,本文还分析了 2021 年 8 月至 2023 年 8 月期间研究区域内潮沟形态的月际变化,采用哨兵二号(Sentinel-2)遥感影像进行分析。

表 1 2022 年 10 月 26 日观测任务流程

Table 1 Observation task plan for October 26, 2022

时间 Time	任务 Task	飞行高度 Flight height/m
5:50(天亮)—6:20	预飞行,生成正射影像,确定航线	150
6:25—7:10	粉砂滩(S7)潮沟航拍	80
7:10—7:30	粉砂滩(S7)潮沟精细化航拍,量化崩岸的贡献	50
7:30—8:10	粉砂淤泥滩(S6)潮沟航拍	80
8:10—8:30	粉砂滩(S7)潮沟精细化航拍,量化崩岸的贡献	50
15:30—16:30	互花米草盐沼滩(S5)潮沟航拍	80
16:30—16:50	粉砂滩(S7)潮沟精细化航拍,量化崩岸的贡献	50
17:00—17:20(天黑)	粉砂滩(S7)潮沟精细化航拍,量化崩岸的贡献	50

2.2 潮沟曲流形态变化及迁移速率分析

对提取的卫星遥感图像和生成的无人机正射影像,采用 ArcGIS 软件提取潮沟两侧岸线,如图 2 中白色实线所示。随后对岸线平滑、插值,生成潮沟中心线^[24, 42]。由于无人机航拍耗时较长,潮沟各段岸线的获取时间不尽相同。因此,本文基于无人机的航拍点位(图 2 中白色圆点),插值出正射影像中各个像素点对应的拍摄时间,以此确定潮沟各段岸线对应的时刻。潮沟摆动速率 R 通过对比摆动前(t_0 时刻)与摆动后(t_1 时刻)潮沟中心线的相对位置来计算,采用动态时间规整法^[43—44](Dynamic Time Warping, DTW),如图 2 所示。DTW 算法可以找到两个时间序列之间的最佳对应关系,使得序列间的整体差异最小化。就潮沟摆动而言,DTW 算法通过寻找一种对应关系,使得摆动前后两条中心线各点之间的总距离最短。具体方法为:在 t_0 时刻(图 2 中红线),本文将潮沟中心线离散为一系列点(如图 2 中的白色实心圆点);随后找到这些散点在新的潮沟中心线(t_1 时刻,图 2 中蓝线)上的对应位置(如图 2 中的白色实心矩形);二者间的距离即为潮沟在($t_1 - t_0$) 时间内的摆动距离 D ,进而可以计算出潮沟的摆动速率 R 。简而言之,DTW 方法通过比较同一条潮沟在不同时间的位置变化,来量化潮沟曲流的摆动速率。该方法可精确地测量潮沟曲流随时间变化,即使这些变化在速度和方向上存在显著差异。潮沟曲流的局部曲率 C 由下式计算^[45—46]:

$$C = -\frac{d\theta}{ds} = \left[\frac{dx}{ds} \frac{d^2y}{ds^2} - \frac{dy}{ds} \frac{d^2x}{ds^2} \right] \times \left[\left(\frac{dx}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dy}{ds} \right)^2 \right]^{-3/2} \quad (2)$$

式中, θ 为潮沟曲流中心线切线与给定方向的夹角, x , y 为笛卡尔坐标系下曲流中心线坐标, s 为沿曲流走向坐标系下坐标。

2.3 潮滩土壤有机碳含量测定

为测定潮滩各区域有机碳含量,分别对互花米草盐沼滩(S5)、粉砂淤泥滩(S6)及粉砂滩(S7)区域进行柱状样采集,采样位置见图 1。在各采样点进行 2—3 次重复采样,采样深度为 1 m,垂直取样间隔为 5 cm。由于钻取柱状样过程中土体发生压缩、变形,实际有效取样深度为 70—80 cm 不等。因为研究区域土壤含水率高,采用二次取样法来进行土壤分层取样。现场采集的土壤样品低温保存后带回实验室分析。土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-分光光度法测定,土体容重通过环刀现场采样测定。为了反映垂直方向上土壤有机碳分布的离散程度,分别计算各取样点土壤有机碳含量的变异系数,即标准差与均值的比值,见表 2。基于曲流摆动速率与有机碳含量,可计算出曲流摆动引起的潮滩沉积物碳输出速率,公式如下:

$$C_r = R \times \text{SCO}_a \times \gamma \times H \times D_c \times \delta_{\text{redox}} \quad (3)$$

式中, C_r 为潮沟摆动引起的沉积物碳输出速率($\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$); R 为潮沟曲流摆动速率(m/a); SCO_a 为有机碳质量分数均值(g/kg); γ 为土壤容重(kg/m^3); H 为潮沟深度(m); D_c 为潮沟密度(km/km^2), 前人研究表明^[7]江苏中部海岸潮沟密度约为 $1.83\text{—}3.68 \text{ km/km}^2$, 因此本研究中 D_c 取均值 2.34 km/km^2 ; δ_{redox} 为接触空气后被氧化的有机碳质量百分比。潮沟曲流摆动过程不仅会带来底层颗粒有机质的释放, 对潮滩可溶性有机碳输出也会带来影响。有机碳(颗粒碳与溶解碳)的氧化还原反应是一个复杂过程, 包括矿化作用^[47]、呼吸作用^[48]、光化反应^[49]等。已有学者探究了海洋环境中有机碳的氧化过程, 并给出了相应的参数化公式和氧化效率评估。例如, Hedges 和 Keil^[50]发现, 当与氧气充分接触后, 75%—95%的可溶性有机碳将在 5 d 内降解; Blair 和 Aller^[28]归纳总结了全球范围内入海泥沙中有机碳的贮存效率, 发现泥沙输运过程中有 56%—80%的颗粒有机碳发生氧化还原反应。因此, 本研究采用参数化的方式, 将暴露出的颗粒有机碳和可溶性有机碳的氧化分解效率通过参数 δ_{redox} 体现。鉴于江苏海岸有机碳氧化分解效率研究较少, 数据匮乏, 本研究中 δ_{redox} 的取值参考前人实验和现场观测结果, 取值为 50%。后续结果分析中, 本文也讨论了不同 δ_{redox} 取值对沉积碳输出速率的影响。由于有机碳的实际有效取样深度不足 1 m, 本研究中潮沟深度设为 0.8 m, 因此计算所得的有机碳输出速率为保守值。

表 2 潮滩土壤参数

Table 2 Soil parameters on tidal flats

取样区域 Sampling area	土体容重/ (kg/m^3) Soil bulk density	土壤有机碳垂向均值/ (g/kg) Mean value of soil organic carbon in vertical direction	变异系数/% Variable coefficient
盐沼滩 Salt marshes	1.6	4.62	18.8
粉砂淤泥滩 Muddy flats	1.85	2.61	22.5
粉砂滩 Silty flats	1.96	1.51	22.2

3 结果与分析

3.1 潮沟曲流迁移摆动速率

图 3 示出了互花米草盐沼滩、粉砂淤泥滩, 以及粉砂滩区域潮沟岸线的短期变化。相较于盐沼滩区域, 粉砂淤泥滩和粉砂滩潮沟摆动现象更为显著。年际尺度的遥感影像分析显示, 粉砂淤泥滩潮沟频繁发生裁弯取直过程, 导致潮沟在该区域内呈现南北向的往复摆动(图 4)。进一步分析表明, 潮沟曲流摆动速率存在明显的空间差异, 如图 5 所示。盐沼滩区域内潮沟曲流摆动速率(中位数)约为 10^{-6} m/s ; 粉砂淤泥滩潮沟摆动速率略有提升, 约为 10^{-5} m/s 。对于粉砂滩潮沟, 观测到其摆动速率高达 10^{-3} m/s , 显著高于其他两个区域。粉砂淤泥滩区域潮沟曲流摆动速率呈现出明显的季节性差异, 表现为冬季($5.6 \times 10^{-6} \text{ m/s}$)高于夏季($2.8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$), 冬季的摆动速率约为夏季的两倍(图 5)。此外, 潮沟曲流摆动速率与曲率之间的相关性(Spearman r) 在盐沼滩区域略高, 但总体呈现低相关性。

3.2 潮滩土壤有机碳含量

图 6 示出了潮滩不同区域土壤有机碳含量的垂向与水平分布特征。土壤有机碳含量在不同深度的分布显示出非单调趋势: 粉砂滩土壤在 20 cm 深度处有机碳含量达到最大值, 而盐沼滩与粉砂淤泥滩有机碳含量峰值出现在 40—50 cm 深度范围内。在盐沼滩和粉砂淤泥滩, 有机碳含量在深层(30—100 cm)表现为随深度递减的变化趋势, 而粉砂滩在不同深度的有机碳含量变化较小。研究区域内土壤有机碳含量的变异系数在 18.8%—22.5%之间, 如表 2 所示, 属于中等变异, 不同区域间无明显变化规律。从水平分布上看, 土壤有机碳含量(均值)在垂直于海岸方向上具有明显变化特征: 盐沼滩(4.62 g/kg) > 粉砂淤泥滩(2.61 g/kg) > 粉砂滩(1.51 g/kg)。

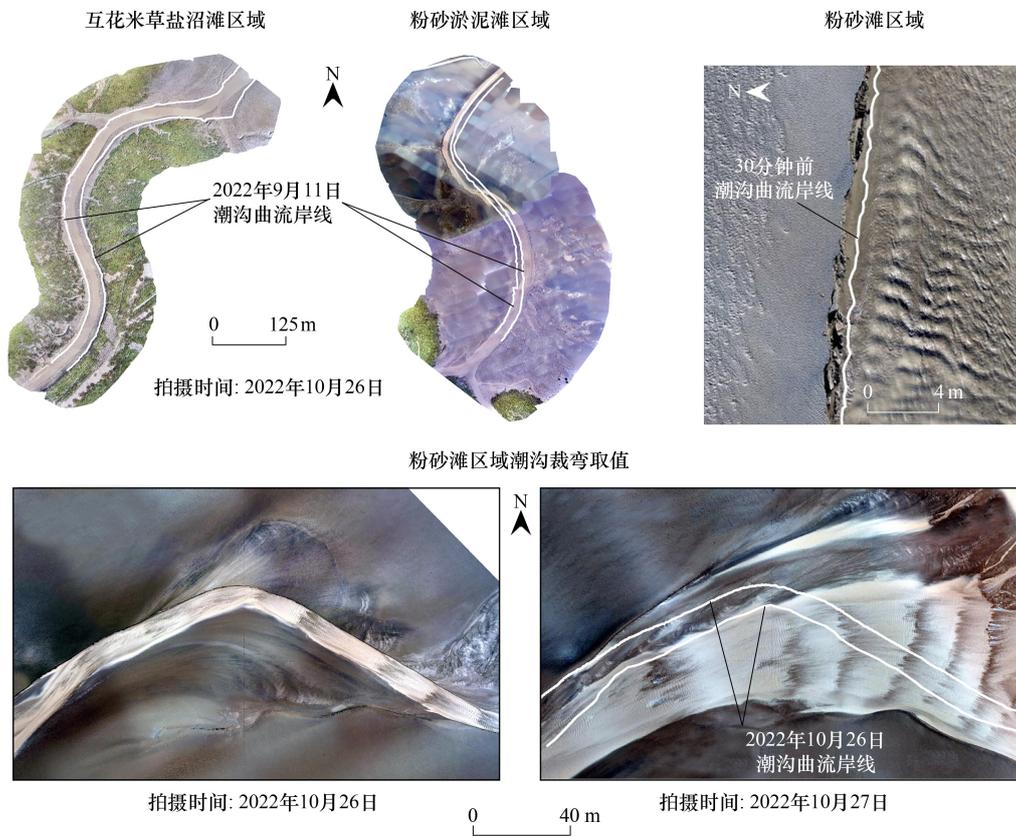


图 3 不同区域潮沟曲流摆动无人机观测

Fig.3 Tidal meander migration in different regions of tidal flats based on UAV observation

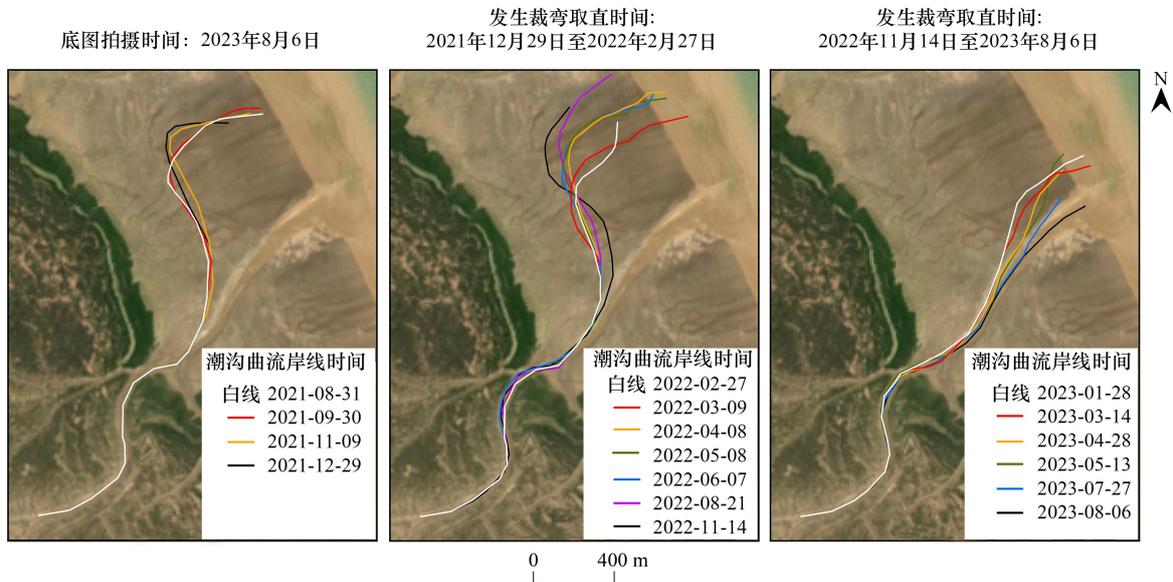


图 4 潮沟曲流摆动遥感反演

Fig.4 Tidal meander migration of tidal flats based on remote sensing images

3.3 潮沟曲流摆动对潮滩沉积物碳输出速率的影响评估

基于潮沟摆动速率与土壤有机碳含量实测数据(参见图 5、图 6),本文评估了潮滩 0—80 cm 深度范围内沉积物碳输出速率,如图 7 所示。虽然土壤有机碳含量沿海向陆逐渐增加,但由潮沟摆动引起的沉积物碳输

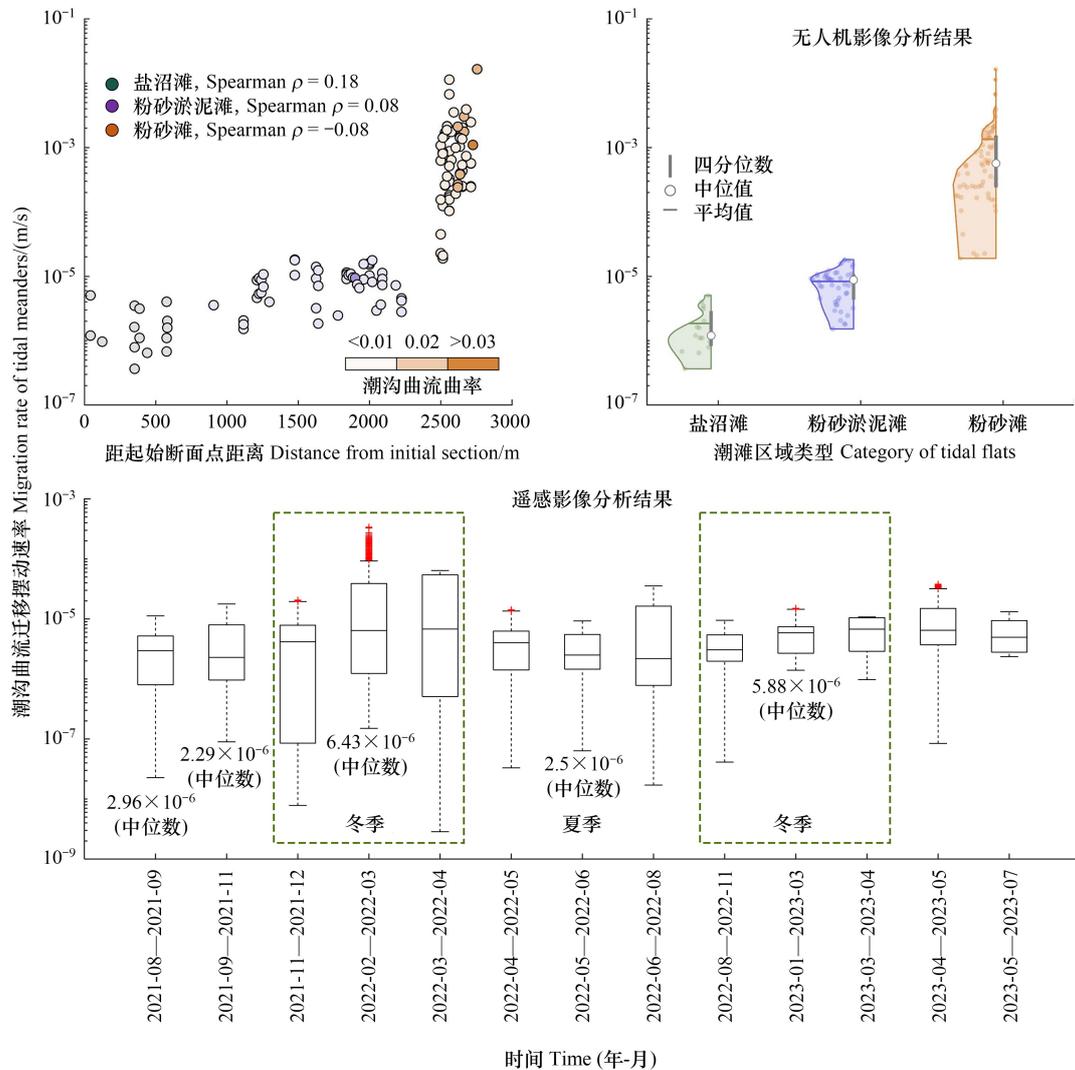


图5 潮沟曲流摆动速率随时间空间变化

Fig.5 Spatiotemporal variations in migration rate of tidal meanders

出速率却呈现相反趋势:互花米草盐沼滩($0.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) < 粉砂淤泥滩($1.2 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) < 粉砂滩($49.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。进一步分析发现,沉积物碳输出速率与潮沟发育程度和氧化效率 δ_{redox} 密切相关,如图7所示。结果显示,随着潮沟密度和有机碳氧化效率的增加,粉砂滩区域沉积物碳输出速率可能超过埋藏速率。

4 讨论

4.1 潮沟曲流摆动速率空间差异的影响因素

关于潮沟曲流,现有研究大多聚焦其形态特征参数,分析蜿蜒度、弯段不对称性等统计意义上的规律^[35, 42, 51],鲜少关注摆动速率的空间差异。本研究开展潮周期时间尺度的无人机观测,发现潮沟曲流摆动强度存在明显的陆向衰减趋势,粉砂滩潮沟的侧向迁移速率高于盐沼区域数个量级(图5)。除了盐沼根系的护岸作用^[52]和潮汐动力的海向增强^[34]外,曲流摆动速率的空间差异可归因于粉砂滩潮沟频繁发生的崩岸过程(图3)。一方面,在潮流冲刷作用下,潮沟岸壁会形成悬臂状结构,进而发生剪切、绕轴等破坏过程^[22, 53–54]。另一方面,泥滩潮沟因不断经历涨、落潮交替过程,沟内水位变幅大、频次高,且沟壁的物质组成多为高透水性、低内聚力粉砂,易形成渗流,导致张拉破坏^[25, 55]。因此,在潮沟岸壁“涨潮潮流冲刷,落潮渗流侵蚀”周期性失稳机制的作用下,粉砂滩潮沟曲流摆动速率显著提高。此外,粉砂滩潮沟频繁的裁弯取直过程使其蜿蜒

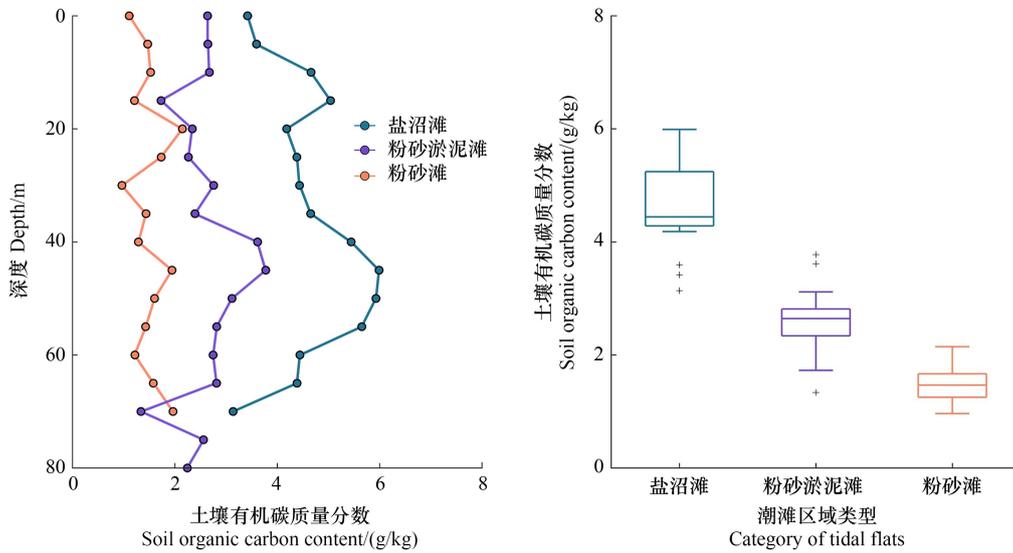


图 6 潮滩土壤有机碳含量空间变化

Fig.6 Spatial variations in soil organic carbon content on tidal flats

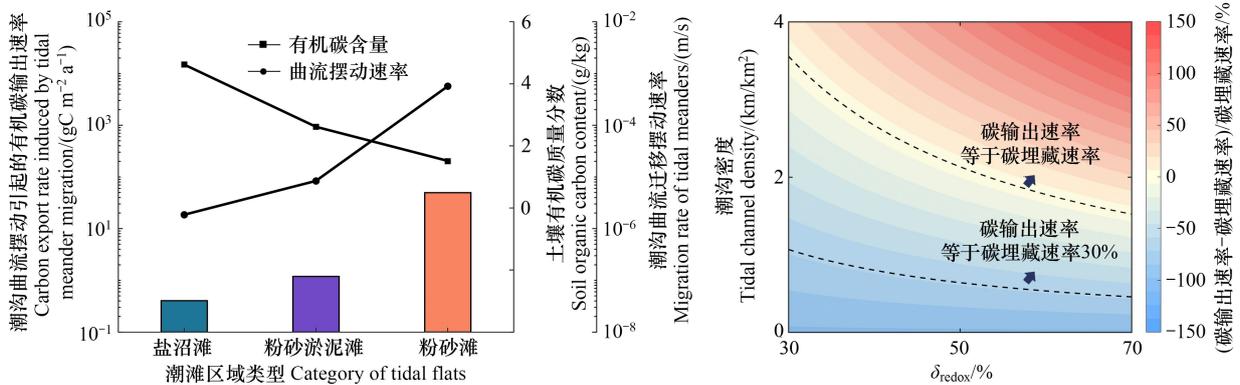


图 7 潮沟曲流摆动引起的潮滩沉积物碳输出

Fig.7 Coastal sediment carbon release driven by tidal meander migration

度显著低于盐沼潮沟(图 3 和图 4)。由于曲流摆动速率随蜿蜒度的变化呈现先增大后减小的趋势^[18],这也解释了为什么粉砂滩潮沟的摆动速率大于盐沼潮沟。

4.2 潮沟曲流摆动对潮滩沉积物有机碳输出影响的过程及机理

关于潮滩沉积物有机碳输出,现有研究主要关注厌氧环境下有机质的缓慢分解(矿化作用^[47]、呼吸作用^[48])、溶解碳随地下水的渗出^[56]、以及盐沼、红树林等生态系统面积的损失对碳输出的影响^[57—58]。本研究发现,潮沟曲流摆动会暴露出大量深层(>30 cm)土壤,这些土壤中的有机碳在随后的搬运过程中逐渐氧化^[28]并释放出二氧化碳。特别地,本研究发现,随着潮沟密度的增加和有机碳氧化效率的提升,无植被泥滩的有机碳输出速率可能超过其埋藏速率(图 7)。其次,本研究还表明潮沟曲流摆动与潮滩土壤有机碳含量的时空分布有关。一方面,粉砂淤泥滩和粉砂滩区域由于水动力作用较强^[38, 59],泥沙冲淤及潮沟曲流摆动更为频繁(图 3 和图 4),裹挟有机质的泥沙被反复搬运^[60],不利于有机碳的封存。另一方面,有研究发现土壤有机碳含量表现出显著的季节性差异,互花米草盐沼区域夏季较冬季高 5%—10%,光滩区域夏季较冬季高 43%^[61]。虽然这一季节性差异可能受到温度、泥沙粒径、干湿交替等因素影响,但本研究的结果表明潮沟曲

流摆动速率的季节性变化也是潜在的影响因素之一(图 5)。由于降雨、季节性风暴的影响,潮沟摆动速率在夏季与冬季之间存在显著差异^[62]。此外,粉沙滩潮沟曲流的快速裁弯取直过程通常在数个潮周期内完成(见图 3)。这一过程导致潮沟曲流在特定区域内频繁变化位置^[63],但由于遥感图像拍摄间隔较长,这些短期变化难以被捕捉。因此,尽管在遥感图像中潮沟位置看似稳定,实际上已发生了显著的沉积物释放。这一发现表明,传统遥感分析可能会低估潮沟曲流摆动引起的潮滩沉积物有机碳输出速率,从而影响对潮滩碳汇功能的准确评估。

4.3 考虑动力地貌过程的潮滩碳汇功能评估

无植被泥滩由于其广阔的面积、较高的初级生产力、以及有限的沉积环境,是潜在的蓝色碳汇^[19-21]。以往对潮滩湿地碳汇功能的研究多关注厌氧环境下有机质的缓慢沉积、封存,以及相应的碳储量评估^[22-23],对地貌演变过程的影响仅关注表层(0—30 cm)深度范围内的冲淤变化^[24]。因此,潮滩环境被认为是有效的蓝色碳汇。然而,本研究发现了潮沟曲流摆动可能导致沉积物碳输出速率超过埋藏速率。这一变化趋势体现了动力地貌过程,特别是泥沙的横向输运,对潮滩湿地碳汇功能的重要作用。因此,准确评估潮滩湿地的碳存储能力,除了要考虑有机碳的输入速率,还需要考虑其沉积、封存过程中因地貌演变而产生的损失量。

此外,无植被泥滩地貌演变过程对各生态系统间的碳交换作用被严重低估。作为陆源有机碳与海源有机碳的交汇地带,无植被泥滩频繁、剧烈的动力地貌过程会输出大量泥沙。这些裹挟有机碳的泥沙或被盐沼捕获(陆向输送),或深埋海底(海向输运),显著促进各生态系统间的碳通量交换^[19]。这一过程对增强潮滩碳汇管理提供了新的思路。除了围绕盐沼、红树林等植被区的保护修复,蓝碳增汇措施还可以与海岸工程安全相结合。例如,构建生态防护措施来减缓光滩区域的地貌演变过程,即保障了海岸工程建设安全,也降低了潮滩沉积物有机碳输出速率。最后,本研究仅粗略评估了潮沟摆动导致的有机碳输出速率,忽略了潮沟密度、潮沟深度、有机质氧化效率等因素的空间差异^[25-28]。鉴于这些差异与潮差、滩面淹没频率、土壤盐度、土壤微生物活性等因素有关^[29-31],仍需开展更多研究来揭示动力地貌过程对潮滩沉积物碳输出及海岸碳汇功能的影响机制。

5 结论

本文围绕潮沟曲流摆动对潮滩沉积物碳输出过程的影响机制,选取江苏中部潮滩-潮沟系统为研究对象,开展了野外观测与室内试验,通过对无人机影像、卫星遥感图像,以及土样数据分析,评估了潮沟曲流摆动对潮滩沉积物碳输出的作用,主要结论如下:

(1) 潮沟曲流摆动速率存在明显的空间差异和季节性变化。受潮沟崩岸影响,粉沙滩曲流摆动速率(10^{-3} m/s)显著高于互花米草盐沼滩(10^{-6} m/s)与粉砂淤泥滩(10^{-5} m/s);粉砂淤泥滩区域潮沟冬季的摆动速率约为夏季两倍。

(2) 潮滩不同区域土壤有机碳含量的垂向与水平分布特征差异显著。土壤有机碳含量随深度变化表现为非单调趋势,其均值自海向陆逐渐增加;互花米草盐沼滩(4.62 g/kg) > 粉砂淤泥滩(2.61 g/kg) > 粉沙滩(1.51 g/kg)。

(3) 综合考虑曲流摆动速率与土壤有机碳含量,发现粉沙滩碳输出速率显著高于盐沼滩与粉砂淤泥滩,可达 $49.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,与该区域的碳埋藏速率相当。

参考文献(References):

- [1] Wang F M, Sanders C J, Santos I R, Tang J W, Schuerch M, Kirwan M L, Kopp R E, Zhu K, Li X Z, Yuan J C, Liu W Z, Li Z A. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change. *National Science Review*, 2020, 8(9): nwa296.
- [2] 王法明,唐剑武,叶思源,刘纪化. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 241-251.
- [3] Macreadie P I, Anton A, Raven J A, Beaumont N, Connolly R M, Friess D A, Kelleway J J, Kennedy H, Kuwae T, Lavery P S, Lovelock C E, Smale D A, Apostolaki E T, Atwood T B, Baldock J, Bianchi T S, Chmura G L, Eyre B D, Fourqurean J W, Hall-Spencer J M, Huxham M,

- Hendriks I E, Krause-Jensen D, Laffoley D, Luisetti T, Marbà N, Masque P, McGlathery K J, Megonigal J P, Murdiyarto D, Russell B D, Santos R, Serrano O, Silliman B R, Watanabe K, Duarte C M. The future of Blue Carbon science. *Nature Communications*, 2019, 10: 3998.
- [4] 韩广轩, 王法明, 马俊, 肖雷雷, 初小静, 赵明亮. 滨海盐沼湿地蓝色碳汇功能、形成机制及其增汇潜力. *植物生态学报*, 2022, 46(4): 373-382.
- [5] Friedrichs C T. Tidal flat morphodynamics. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Amsterdam: Elsevier, 2011: 137-170.
- [6] Hughes Z J. Tidal channels on tidal flats and marshes. Davis Jr, R, Dalrymple R. *Principles of Tidal Sedimentology*. Dordrecht: Springer, 2012: 269-300.
- [7] 吴德力, 沈永明, 方仁建. 江苏中部海岸潮沟的形态变化特征. *地理学报*, 2013, 68(7): 955-965.
- [8] 吕亭豫, 龚政, 张长宽, 耿亮, 张茜. 粉砂淤泥质潮滩潮沟形态特征及发育演变过程研究现状. *河海大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(2): 178-188.
- [9] 辛沛, 金光球, 李凌, 宋志尧. 崇明东滩盐沼潮沟水动力过程观测与分析. *水科学进展*, 2009, 20(1): 74-79.
- [10] Lanzoni S, D'Alpaos A. On funneling of tidal channels. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2015, 120(3):433-52.
- [11] 谢卫明, 何青, 王宪业, 郭磊城, 郭超. 潮沟系统水沙输运研究——以长江口崇明东滩为例. *海洋学报*, 2017, 39(7): 80-91.
- [12] Ganju N K, Defne Z, Eelsey - Quirk T, Moriarty J M. Role of tidal wetland stability in lateral fluxes of particulate organic matter and carbon. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(5): 1265-1277.
- [13] Sasmito S D, Kuzyakov Y, Lubis A A, Murdiyarto D, Hutley L B, Bachri S, Friess D A, Martius C, Borchard N. Organic carbon burial and sources in soils of coastal mudflat and mangrove ecosystems. *CATENA*, 2020, 187: 104414.
- [14] Kirwan M L, Megonigal J P, Noyce G L, Smith A J. Geomorphic and ecological constraints on the coastal carbon sink. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4: 393-406.
- [15] Phang V X H, Chou L M, Friess D A. Ecosystem carbon stocks across a tropical intertidal habitat mosaic of mangrove forest, seagrass meadow, mudflat and sandbar. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(10): 1387-1400.
- [16] Guimond J A, Seyfferth A L, Moffett K B, Michael H A. A physical-biogeochemical mechanism for negative feedback between marsh crabs and carbon storage. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(3): 034024.
- [17] 王启栋, 宋金明, 李学刚. 黄河口湿地有机碳来源及其对碳埋藏提升策略的启示. *生态学报*, 2015, 35(2): 568-576.
- [18] Saintilan N, Kovalenko K E, Guntenspergen G, Rogers K, Lynch J C, Cahoon D R, Lovelock C E, Friess D A, Ashe E, Krauss K W, Cormier N, Spencer T, Adams J, Raw J, Ibanez C, Scarton F, Temmerman S, Meire P, Maris T, Thorne K, Brazner J, Chmura G L, Bowron T, Gamage V P, Cressman K, Endris C, Marconi C, Marcum P, St Laurent K, Reay W, Raposa K B, Garwood J A, Khan N. Constraints on the adjustment of tidal marshes to accelerating sea level rise. *Science*, 2022, 377(6605): 523-527.
- [19] Kirwan M L, Mudd S M. Response of salt-marsh carbon accumulation to climate change. *Nature*, 2012, 489: 550-553.
- [20] Ladd C J T, Duggan-Edwards M F, Bouma T J, Pagès J F, Skov M W. Sediment supply explains long-term and large-scale patterns in salt marsh lateral expansion and erosion. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(20): 11178-11187.
- [21] Zhou Z, Coco G, Townend I, Olabarrieta M, van der Wegen M, Gong Z, D'Alpaos A, Gao S, Jaffe B E, Gelfenbaum G, He Q, Wang Y P, Lanzoni S, Wang Z B, Winterwerp H, Zhang C K. Is "morphodynamic equilibrium" an oxymoron? *Earth-Science Reviews*, 2017, 165: 257-267.
- [22] Zhao K, Coco G, Gong Z, Darby S E, Lanzoni S, Xu F, Zhang K L, Townend I. A review on bank retreat: mechanisms, observations, and modeling. *Reviews of Geophysics*, 2022, 60(2): e2021RG000761.
- [23] Gao C, Finotello A, D'Alpaos A, Ghinassi M, Carniello L, Pan Y P, Chen D Z, Wang Y P. Hydrodynamics of meander bends in intertidal mudflats: a field study from the macrotidal Yangkou coast, China. *Water Resources Research*, 2022, 58(12): e2022WR033234.
- [24] Finotello A, Lanzoni S, Ghinassi M, Marani M, Rinaldo A, D'Alpaos A. Field migration rates of tidal meanders recapitulate fluvial morphodynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(7): 1463-1468.
- [25] 龚政, 唐帅, 赵堃, 张凯丽. 渗流对潮沟沟壁崩塌影响的三维物理模型试验研究. *水科学进展*, 2023, 34(2): 290-298.
- [26] 葛嘉欣, 崔步礼, 王晓杰, 谢宝华, 赵明亮, 于冬雪, 于洋, 宋维民, 马海青, 张孝帅, 韩广轩. 潮沟形态对潮滩湿地土壤有机碳空间分布的影响. *环境工程*, 2023, 41(6): 23-31.
- [27] Bianchi T S, Schreiner K M, Smith R W, Burdige D J, Woodard S, Conley D J. Redox effects on organic matter storage in coastal sediments during the Holocene: a biomarker/proxy perspective. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2016, 44: 295-319.
- [28] Blair N E, Aller R C. The fate of terrestrial organic carbon in the marine environment. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4: 401-423.
- [29] Bauer J E, Cai W J, Raymond P A, Bianchi T S, Hopkinson C S, Regnier P A G. The changing carbon cycle of the coastal ocean. *Nature*, 2013, 504: 61-70.
- [30] Bianchi T S, Cui X Q, Blair N E, Burdige D J, Eglinton T I, Galy V. Centers of organic carbon burial and oxidation at the land-ocean interface. *Organic Geochemistry*, 2018, 115: 138-155.
- [31] 刘永学, 张忍顺, 李满春. 江苏淤泥质潮滩遥感影像特征与信息提取方法研究. *遥感信息*, 2004, 19(1): 23-26, 61.
- [32] 劳聪聪, 辛沛, 左寅, 程海峰. 1996—2020 年长江口九段沙湿地植被覆盖对潮沟演变规律的影响. *水科学进展*, 2022, 33(1): 15-26.
- [33] 龚政, 张岩松, 赵堃, 周曾, 张长宽. 风暴作用下淤泥质潮滩-潮沟系统地貌演变研究进展. *水利水电科技进展*, 2019, 39(4): 75-84.
- [34] 龚政, 耿亮, 吕亭豫, 周曾, 严佳伟, 张长宽. 开敞式潮滩-潮沟系统发育演变动力机制——II. 潮汐作用. *水科学进展*, 2017, 28(2): 231-239.

- [35] Gao C, Finotello A, Wang Y P. Predominant landward skewing of tidal meanders. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022, 47(13): 3199-3215.
- [36] Gong Z, Jin C, Zhang C K, Zhou Z, Zhang Q, Li H. Temporal and spatial morphological variations along a cross-shore intertidal profile, Jiangsu, China. *Continental Shelf Research*, 2017, 144: 1-9.
- [37] Zhao K, Gong Z, Zhang K L, Wang K Y, Jin C, Zhou Z, Xu F, Coco G. Laboratory experiments of bank collapse: the role of bank height and near-bank water depth. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2020, 125(5): e2019JF005281.
- [38] Zhang Q, Gong Z, Zhang C K, Townend I, Jin C, Li H. Velocity and sediment surge: what do we see at times of very shallow water on intertidal mudflats? *Continental Shelf Research*, 2016, 113: 10-20.
- [39] 龚政, 靳闯, 张长宽, 李欢, 辛沛. 江苏淤泥质潮滩剖面演变现场观测. *水科学进展*, 2014, 25(6): 880-887.
- [40] Jin C, Gong Z, Shi L, Zhao K, Tinoco R O, San Juan J E, Geng L, Coco G. Medium-term observations of salt marsh morphodynamics. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 988240.
- [41] Dai W Q, Li H, Zhou Z, Cybele S, Lu C Z, Zhao K, Zhang X Y, Yang H T, Li D Y. UAV photogrammetry for elevation monitoring of intertidal mudflats. *Journal of Coastal Research*, 2018, 85: 236-240.
- [42] Marani M, Lanzoni S, Zandolin D, Seminara G, Rinaldo A. Tidal meanders. *Water Resources Research*, 2002, 38(11): 1225.
- [43] Sylvester Z, Durkin P, Covault J A. High curvatures drive river meandering. *Geology*, 2019, 47(3): 263-266.
- [44] Ielpi A, Lapôte M G A, Finotello A, Roy-Léveillé P. Large sinuous rivers are slowing down in a warming Arctic. *Nature Climate Change*, 2023, 13: 375-381.
- [45] Lopez Dubon S, Lanzoni S. Meandering evolution and width variations: a physics-statistics-based modeling approach. *Water Resources Research*, 2019, 55(1): 76-94.
- [46] Frascati A, Lanzoni S. A mathematical model for meandering rivers with varying width. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(3): 1641-1657.
- [47] Yang P, Zhang L H, Lai D, Yang H M, Tan L S, Luo L J, Tong C, Hong Y, Zhu W Y, Tang K W. Landscape change affects soil organic carbon mineralization and greenhouse gas production in coastal wetlands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2022, 36, e2022GB007469.
- [48] 焦念志, 张传伦, 李超等. 海洋微型生物碳泵储碳机制及气候效应. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(01): 1-18.
- [49] Miller W L, Moran M A. Interaction of photochemical and microbial processes in the degradation of refractory dissolved organic matter from a coastal marine environment. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(6): 1317-1324.
- [50] Hedges J I, Keil R G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis. *Marine Chemistry*, 1995, 49(2): 137-139.
- [51] Finotello A, D'Alpaos A, Bogoni M, Ghinassi M, Lanzoni S. Remotely-sensed planform morphologies reveal fluvial and tidal nature of meandering channels. *Scientific Reports*, 2020, 10: 54.
- [52] 任璘婧, 李秀珍, 杨世伦, 闫中正, 黄星. 崇明东滩盐沼植被变化对滩涂湿地促淤消浪功能的影响. *生态学报*, 2014, 34(12): 3350-3358.
- [53] Gong Z, Zhao K, Zhang C K, Dai W Q, Coco G, Zhou Z. The role of bank collapse on tidal creek ontogeny: a novel process-based model for bank retreat. *Geomorphology*, 2018, 311: 13-26.
- [54] Zhao K, Gong Z, Xu F, Zhou Z, Zhang C K, Perillo G M E, Coco G. The role of collapsed bank soil on tidal channel evolution: a process-based model involving bank collapse and sediment dynamics. *Water Resources Research*, 2019, 55(11): 9051-9071.
- [55] Wang K Y, Gong Z, Zhao K, Tang S, Zhang K L. A three-dimensional experimental study on bank retreat: the coupled role of seepage and surface flow. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 1054077.
- [56] Maher D T, Santos I R, Golsby-Smith L, Gleeson J, Eyre B D. Groundwater-derived dissolved inorganic and organic carbon exports from a mangrove tidal creek: the missing mangrove carbon sink? *Limnology and Oceanography*, 2013, 58(2): 475-488.
- [57] Campbell A D, Fatoyinbo L, Goldberg L, Lagomasino D. Global hotspots of salt marsh change and carbon emissions. *Nature*, 2022, 612: 701-706.
- [58] Adame M F, Connolly R M, Turschwell M P, Lovelock C E, Fatoyinbo T, Lagomasino D, Goldberg L A, Holdorf J, Friess D A, Sasmito S D, Sanderman J, Sievers M, Buelow C, Kauffman J B, Bryan-Brown D, Brown C J. Future carbon emissions from global mangrove forest loss. *Global Change Biology*, 2021, 27(12): 2856-2866.
- [59] Wang Y P, Gao S, Jia J J, Thompson C E L, Gao J H, Yang Y. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China. *Marine Geology*, 2012, 291: 147-161.
- [60] 曹磊, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段丽琴. 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展. *生态学报*, 2013, 33(17): 5141-5152.
- [61] 龚政, 文天翼, 靳闯, 赵堃, 苏敏. 江苏中部潮滩湿地土壤有机碳分布特征及影响因子. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 2978-2984.
- [62] Choi K, Jo J H. Morphodynamics of tidal channels in the open coast macrotidal flat, southern gyeonggi bay, west coast of Korea. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85(6): 582-595.
- [63] Gao C, Lazarus E D, D'Alpaos A, Ghinassi M, Ielpi A, Parker G, Rinaldo A, Gao P, Wang Y P, Tognin D, Finotello A. Morphometry of tidal meander cutoffs indicates similarity to fluvial morphodynamics. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(1): e2023GL105893.